

# 车用润滑油在线监测方法与监测系统

刘玉梅<sup>1</sup>,王庆年<sup>2</sup>,曹晓宁<sup>1</sup>,熊伟<sup>3</sup>,李雪海<sup>1</sup>

(1. 吉林大学 交通学院, 长春 130022; 2. 吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022; 3. 长春轨道客车股份有限公司, 长春 130025)

**摘要:**通过理论和试验分析的方法确定了介电常数作为润滑油品质衰变评价指标的可行性, 研发了准确检测润滑油介电常数的玻璃管型车载电容传感器及脉冲调宽式振荡检测电路, 并以此为基础开发了润滑油综合性能在线监测系统, 从而实现了车用润滑油的按质换油, 克服了“观察换油”或“按期换油”的弊端。

**关键词:**车辆工程; 润滑油; 介电常数; 电容式传感器; 在线监测系统

**中图分类号:**U473.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)06-1441-05

## Vehicle lubrication oil on-line monitoring method and monitoring system

LIU Yu-mei<sup>1</sup>, WANG Qing-nian<sup>2</sup>, CAO Xiao-ning<sup>1</sup>, XIONG Wei<sup>3</sup>, LI Xue-hai<sup>1</sup>

(1. College of Transportation, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Automotive Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Changchun Railway Vehicle CO. LTD, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The feasibility of using the dielectric constant as an evaluation index to evaluate the quality degradation of the lubrication oil was verified through theoretical analysis and experimental approach. A glass-tube sensor to detect accurately the dielectric constant of the lubrication oil and a related PWM oscillation detection circuit were developed. A monitoring system to monitor on-line the comprehensive properties of the lubrication oil was made up based on the above-mentioned components, thus realizing to change the vehicle lubrication oil according to its quality instead of according to visual observation or on schedule.

**Key words:** vehicle engineering; lubrication oil; dielectric constant; capacitance sensor; on-line monitoring system

润滑油变质程度直接影响发动机的工作状况, 实时监测发动机润滑油状况可避免按期换油和传统实验室离线检测的不足<sup>[1]</sup>。介电常数是反映润滑油性能的敏感性指标, 本文初步研发了玻璃管型车载电容传感器和车载监测系统, 从而可以准确测量油品品质的变化。当油液的介电常数超过使用阈值时, 车载监测系统的警示灯会闪烁,

可及时向驾驶员报告润滑油状况。

### 1 介电常数作为润滑油综合性能评价指标的理论基础

润滑油是一种由多种具有介电稳定性的烃类组成的复杂混合物, 可以作为电介质来考虑, 因

收稿日期: 2009-01-17.

基金项目: “863”国家高技术研究发展计划项目(2006AA04Z10); 长春市科技基金项目(06GJ14).

作者简介: 刘玉梅(1966-), 女, 教授. 研究方向: 车辆智能检测与诊断, 车辆性能监测与虚拟测试技术.

E-mail: lymls@163.com

此本文用现代电介质物理学对其进行研究。

介电常数,又称电容率,可通过测量平行板电容器的电容来间接获得

$$C = \frac{\epsilon S}{\delta} \quad (1)$$

进行公式变换<sup>[2]</sup>,得

$$\epsilon = \frac{C\delta}{S} \quad (2)$$

式中: C 为填充电介质时测得的电容, F, S 为极板的面积, m<sup>2</sup>; δ 为极板之间的距离, m; ε 为介质的介电常数, F/m。

润滑油在交变电场下会发生电子位移式极化和取向式极化,极化成分的质量分数直接影响介电常数的大小<sup>[3]</sup>。由于不同物质的介电常数差别很大,且润滑油中的金属颗粒、水、酸性物质的介电常数远大于油的介电常数。随着润滑油氧化或被污染,介电常数明显增大。合理标定电容传感器介质的介电常数阈值,就可以综合评价润滑油品质衰变程度。

$$\frac{\epsilon_{\text{在用油}}}{\epsilon_{\text{新油}}} = \frac{C_{\text{在用油}}}{C_{\text{新油}}} \quad (3)$$

由式(3)可以看出,通过测量电容器完全浸没在新油和在用润滑油中的电容,就可以确定机油品质的劣化程度,确定换油时机<sup>[4]</sup>。

## 2 试验验证

在润滑油的理化指标中,杂质、水分、酸值对润滑油品质衰变影响最大,所以本试验以研究三者与介电常数之间关系为目标。

### 2.1 试验原理

由于有机酸会产生 H<sup>+</sup>、RCOO<sup>-</sup> 离子,金属颗粒会产生自由电子,水会产生 H<sup>+</sup>、OH<sup>-</sup> 离子,当电容器以润滑油作介质时,离子极化,介电常数会增大。通过测量新油和在用油的介电常数,然后对比两个测量数据,即可判断油液的变质程度。

### 2.2 试验过程

试验在 YH-1 型润滑油质量检测仪上进行,考虑到在同一条件下不同类型和级别的润滑油的介电常数值也有差别,分别选取牌号为 SF20 W/30(A)、SF15 W/30(B)、SE10 W/30(C)、SE5 W/30(D)的润滑油为研究对象。人为加入相应物质配制出酸值、铁含量、水分不同的机油试样。按照介电常数测试法进行测试并记录测量数据。

### 2.3 试验数据处理

#### (1) 酸值与介电常数的关系

利用 Matlab 中曲线拟合方法拟合出每种牌号机油酸值和介电常数之间的变化关系曲线,如图 1 所示,从图可以看出酸值增加,介电常数也随之增大,表明介电常数与酸值之间有良好的相关性。

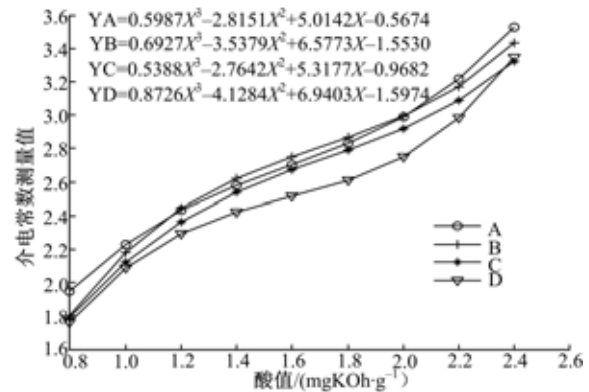


图 1 介电常数与酸值的关系曲线

Fig. 1 The affiliation about the dielectric constant with the acid number

#### (2) 铁含量与介电常数的关系

图 2 为机油含铁量与介电常数之间的关系曲线,所示曲线的变化趋势表明,润滑油中铁含量增加,介电常数随之增大,几乎成线性关系。

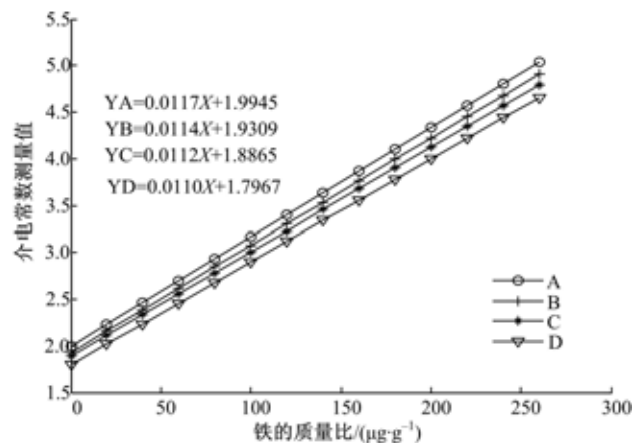


图 2 介电常数与铁含量的关系曲线

Fig. 2 The relationship between the dielectric constant and the acid the content of iron

#### (3) 水分与介电常数的关系

如图 3 所示,由于水的介电常数很大,所以含水量微量增加,油液介电常数就会迅速变化。介电常数法对润滑油中水的敏感性较高。

### 2.4 试验结论

通过试验分析,建立了单一指标与介电常数的映射关系,验证结果表明,3 个关键性指标与介电常数变化趋势一致,说明介电常数可以作为润

滑油衰变程度的综合评价指标。

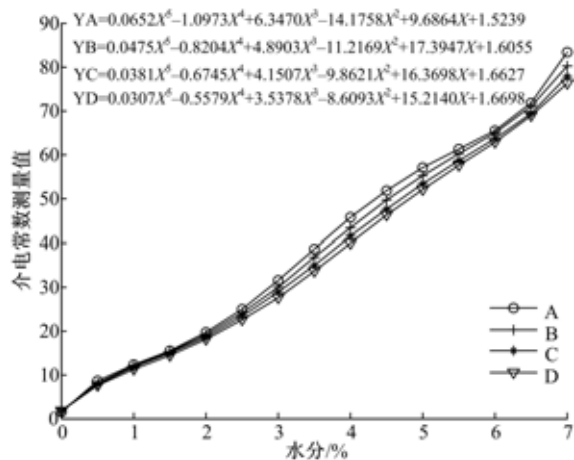


图 3 介电常数与水分的关系曲线

Fig. 3 The change tendency of the dielectric constant with the water value

### 3 介电常数传感器的设计

由式(1)可以看出,介电常数与电容成正比关系。变介电常数电容器是将油液介电常数的变化转化为电容传感器电容值的变化而达到监测目的的<sup>[5]</sup>。由于介电常数的变化微小,因此要求传感器具有高灵敏度和高精度<sup>[6]</sup>。

考虑到传统电容传感器油液流态的突变和沉积膜等因素对测量精度的影响及自动清洗困难等问题,本文初步设计了一种圆弧形极板玻璃管型电容传感器,可直接与油路管道连接实现在线监测。

#### 3.1 结构设计

图 4 为玻璃管型电容传感器示意图,由内外半径分别为  $r$  和  $R$  的玻璃管与紧贴该管外壁的两半圆弧形电极组成, $\Delta\alpha$  为两半极板边缘空隙的弧角的一半,两极板内表面形成电容器。使用时

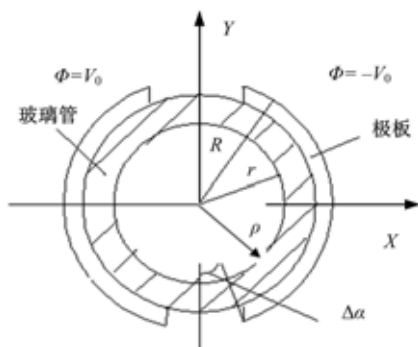


图 4 传感器横截面及电位分布示意图

Fig. 4 The profile of sensor and the potential distribution

油液由玻璃管内腔流过。这样,油液不会与极板相接触。由于油液与玻璃表面的亲附力很弱,在一定流速下沉积于管内的油膜易于冲洗,同时,由于其结构特点,极易与油路管道直接连接实现在线监测。

#### 3.2 数学模型的建立

设两电极电位分别为  $+V_0$  和  $-V_0$ ,管内电位柱坐标用  $(\rho, \alpha, z)$  表示,对管内电位分布运用圆柱坐标系中拉普拉斯方程对边界条件及管内电位进行分析:

$$\frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (4)$$

极板电荷密度为

$$\sigma = 2 V_0 \epsilon_r \epsilon_0 / (R \pi^2 \sin \alpha) \quad (5)$$

极板上总的自由电荷为

$$Q = \int_{\Delta\alpha}^{\pi-\Delta\alpha} \sigma L R d\alpha \quad (6)$$

积分后整理,得

$$Q = 2 K V_0 \epsilon_r \epsilon_0 \quad (7)$$

因此

$$C = Q / \Delta V = K \epsilon_0 \epsilon_r \quad (8)$$

式中:  $K = \frac{l}{2\pi^2} (\text{Intg} \frac{\pi - \Delta\alpha}{2} - \text{Intg} \frac{\Delta\alpha}{2}) \quad (9)$

在不考虑其他因素的情况下,待测油液的电容与玻璃管管壁电容可视为串联<sup>[7]</sup>,玻璃管中未充待测油液时同理,即总电容值可以分别表示为

$$\begin{cases} C' = \frac{C_g C_a}{C_g + C_a} \\ C'' = \frac{C_g C_L}{C_g + C_L} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C_g = \frac{C_a C'}{C_a - C'} \\ C_L = \frac{C'' C_g}{C_g - C''} \end{cases} \quad (10)$$

由于  $C = Q / \Delta V = K \epsilon_0 \epsilon_r$ , 所以

$$C_L = \frac{K \epsilon_0 \epsilon_a \cdot C' \cdot C''}{K \epsilon_0 \epsilon_a (C' - C'') - C' \cdot C''} \quad (11)$$

式中:  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_a$  为空气的介电常数;  $C'$ 、 $C''$  分别为未充油液及充满待测油液测得的电容;  $C_g$ 、 $C_a$ 、 $C_L$  分别为玻璃管电容、空气介质测得电容和待测油液电容。

#### 3.3 参数设计

在设计传感器参数时,既要满足结构要求,又要考虑传感器灵敏度及精度要求。

##### (1) 长度及极角

灵敏度  $\delta = dC / d\epsilon_r = K \epsilon_0$ ,  $K$  与  $L$  成正比,为提高灵敏度,应增加  $L$  值,但是受到结构的限制。尽管减少  $\Delta\alpha$  也可以提高  $K$ ,但是会导致极板被击穿<sup>[8]</sup>。综合考虑,  $L$  选为 250~400 mm,  $\Delta\alpha$  为  $5 \pm 2^\circ$ 。本文  $L$  最终选为 260,  $\Delta\alpha = 6^\circ$ 。代入可

以求出灵敏度  $\delta = K\epsilon_0 = 78.76$ ,符合测试要求。

(2)玻璃管壁厚

玻璃管壁越薄,传感器的灵敏度越高。但又考虑到结构强度要求,且要便于加工,因此选定为 0.5 mm。

其他参数初步设定为:极板材料为活性炭纤维,厚度为 0.25 mm;保护层材料为陶瓷,厚度为 0.2 mm;玻璃管内径(同于油管内径)为 6 mm,外径为 8 mm,长度为 98 mm。

### 4 监测电路及系统设计

#### 4.1 监测电路

考虑到电容传感器虽可以间接测得介电常数,但由于电容变化幅度小,不易直接测量,本文选择脉冲调宽式振荡电路,通过测量频率变化间接得到电容变化,其工作过程如图 5 所示。

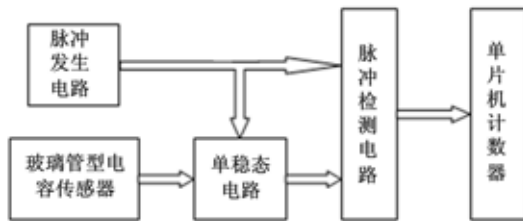


图 5 脉冲调宽式振荡电路工作过程示意图

Fig. 5 The process of PWM-oscillator circuit

图 6 为脉冲调宽式介电常数测试电路图,外界元件  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $C_X$  和 IC1a 构成一个无稳态多谐振荡器, $R_3$ 、 $C_X$  和 IC1b 构成一个单稳态多谐振荡器,即所设计的玻璃管型电容传感器是振荡器电路的一部分。图中  $R_2 = R_3 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_1 = 1\text{ k}\Omega$ ,  $C_1 = 0.035\text{ pF}$ 。

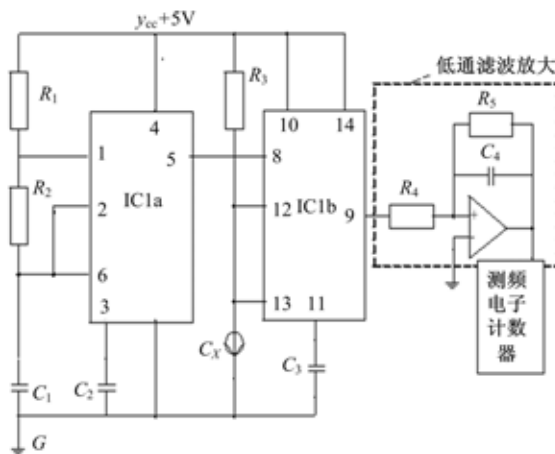


图 6 脉冲调宽式测量介电常数电路图

Fig. 6 PWM-dielectric constant measurement circuit

#### diagram

基于振荡电路原理,电容变化转化为频率变化,单片机定时器测出频率<sup>[9]</sup>,然后用式(12)表示出  $C_X$ 。

$$f = 1.1 / (R_3 C_X) \tag{12}$$

输出信号通过滤波器滤波及放大器放大后,再由单片机计数器口进行处理。

$$\epsilon = C_X / K = K / f \tag{13}$$

$$K = 1.1 / (R_3 K) \tag{14}$$

结合式(3)和式(13)得

$$\frac{\epsilon_{在用油}}{\epsilon_{新油}} = \frac{f_{新油}}{f_{在用油}} \tag{15}$$

#### 4.2 监测系统

将监测系统安装在被测发动机的细滤器和机油泵之间。车辆加注新油时,电控电磁阀开启,取出新油油样在预留室中,电磁阀关闭。监测时,传感器先后检测在用油和预留在系统中新油的介电常数,检测电路将输出的两组信号滤波放大再送入电子计数器,单片机进行数据分析处理,即可得出在用油的劣化程度,进而确定是否换油。如需更换,则发出警示。监测过程如图 7 所示。

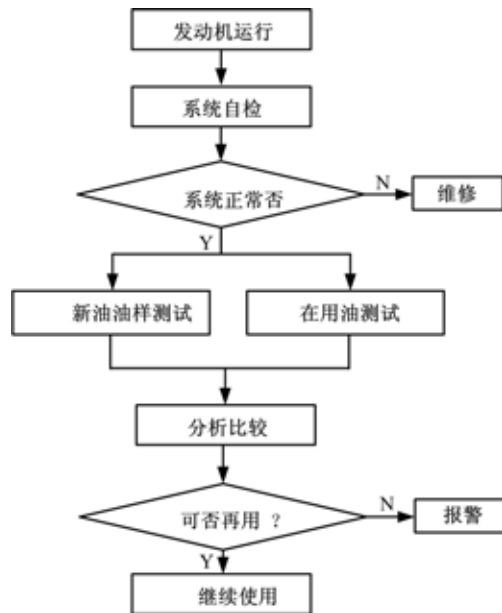


图 7 系统监测过程示意图

Fig. 7 The monitoring process diagram of the system

#### 4.3 系统试验

将本文开发的监测系统应用于营运车辆上,按介电常数阈值进行润滑油品质劣变报警,并对试验车辆发动机机油的理化性能指标进行跟踪检测,得到如表 1 所示的测试结果。测试结果表明,该监测系统能够按照润滑油品质的劣变状况报警

表 1 监测系统的实车试验数据

Table 1 The Tested Cars' Experimental Dates of the Monitoring System

车型	使用润滑油品牌	使用润滑油级别	本换油周期 行驶里程/km	介电 常数	理化指标				
					100℃运动黏 度变化率/%	酸值增加量/ (mgKOH·g <sup>-1</sup> )	闪点 /℃	铁 /10 <sup>-6</sup>	正戊烷不 溶物/%
JettaCiF	一汽大众原装机油	SJ 5W-40	4592		6.68	1.95	209	37.9	0.42
JettaCiF	德国大众专用	SG 15W-40	5816		11.8	1.91	198	28.4	0.23
JettaCiX	德国大众专用	SG 15W-40	5342	4.25	6.80	1.61	207	33	0.54
JettaCEF	奥吉娜	SG/CC 10W-40	7006		14.9	2.0	208	31.0	0.13
JettaCiF	壳牌黄喜力	SJ 10W-40	8053		15.7	1.99	202	27.1	0.20
JettaSDI	壳牌黄喜力	CH-4 15W-40	5000	4.7	8.2	1.62	208	50.7	1.03
JettaSDI	福斯	CF 10W-40	6235		10.1	1.99	206	35.5	0.90

注:国家报废标准:100℃运动黏度变化率超过25%,酸值增加量大于2.0,闪点低于165℃,铁含量超过150mg/kg,正戊烷不溶物大于1.5%。只要有一个理化指标达到国家报废标准,即需要更换新油。

换油,避免了传统换油方法中良好机油的过早更换和劣质机油的继续使用。

## 5 结束语

研究了酸值、含铁量、水分与介电常数变化的相关性,验证了介电常数可以作为润滑油综合性能的评价指标。针对润滑油按期换油及传统监测的不足,开发了配有玻璃管电容传感器的脉冲调宽式介电常数监测系统,试验结果表明,该监测系统能够实现润滑油品质的车载检测,从而可以实时监测油液劣变程度,保证按质换油。

### 参考文献:

- [1] 曹凯. 介电常数法评价发动机性能[J]. 合成润滑材料, 2004, 31: 4-6.  
Cao Kai. Performances evaluation of engine by dielectric constant [J]. Synthetic Lubricants, 2004, 31: 4-6.
- [2] 肖志红. 平板式电容传感器电路研究[J]. 现代电子技术, 2004(17): 105-108.  
Xiao Zhi-hong. Research on measuring circuit of parallel electrode capacitive sensor [J]. Modern Electronic Techonoly, 2004(17): 105-108.
- [3] 陈敏, 杨欣荣. 测量油品含水量的电容式传感器机理[J]. 传感器技术, 2002, 21(7): 17-20.  
Chen Min, Yang Xin-rong. Mechanism of capacitive sensor measuring the mass fraction of water in oil [J]. Transducer Technology, 2002, 21(7): 17-20.
- [4] 于战果, 王宝光. 应用探针式电容传感器检测发动机润滑油品质的研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2):

171-173.

- Yu Zhan-guo, Wang Bao-guang. Study on the detection method to the quality of engine lubrication oil by a pin probe capacitance sensor[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 171-173.
- [5] Jenkins Carey, Mastbergen Daniel, Stanglmaier Rudolf. Measurement of the percentage of biodiesel in blends with a commercial dielectric fuel sensor[C]// Proceedings of ASME Internal Combustion Engine Division 2006 Fall Technical Conference, American Society of Mechanical Engineers, Internal Combustion Engine Division (Publication) ICE, 2006.
- [6] Scherer M, Arndt M, Bertrand P, et al. Fluid condition monitoring sensors for diesel engine control [C]// IEEE, 2004, 1: 459 - 462.
- [7] James Bennett, Robert Lattin, Leonid Matsiev, et al. Technologies new solid state oil condition sensor for real time engine oil condition monitoring[C]// SAE Paper, 2006-01-1324.
- [8] 李红旗. 基于介电常数的车用润滑油在线监测方法研究[D]. 长春: 吉林大学交通学院, 2007.  
Li Hong-qi. Study on the inspection method of vehicle lubricant based on the technology of dielectric coefficient[D]. Changchun: College of Transportation, Jilin University, 2007.
- [9] 朱兆清. 利用单片机测量介电常数[J]. 实验室研究与探索, 2005, 24(6): 48-50.  
Zhu Zhao-qing. The dielectric constant test with microcontroller[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2005, 24(6): 48-50.